

丹生ダムに伴う琵琶湖への影響について (1/3)

- 姉川・高時川融雪水の丹生ダム貯留による琵琶湖深層部DOへの影響について -

平成 17 年 5 月 13 日

琵琶湖河川事務所

目 次

§ 1 . 姉川・高時川融雪水の丹生ダム貯留による琵琶湖深層部D Oへの影響について.....	1-1
1.1 琵琶湖の循環のメカニズム.....	1-1
1.2 琵琶湖深層部D Oの冬季の回復の支配要因.....	1-23
1.3 琵琶湖深層部D Oの回復と姉川からの融雪水流入の関係.....	1-40
1.4 水温からみた姉川河川水の潜り込みの可能性.....	1-62
1.5 融雪出水の琵琶湖への侵入・拡散状況.....	1-65
1.6 循環により深層部に供給されたD O量.....	1-81
1.7 まとめ.....	1-94

§ 1 . 姉川・高時川融雪水の丹生ダム貯留による琵琶湖深層部DOへの影響について

1.1 琵琶湖の循環のメカニズム

(1) 深層部DOの回復状況と関連要因の挙動

琵琶湖冷却期におけるDO回復メカニズムの検討に資するよう、**図 1.1.1** に示す安曇川沖中央（水機構観測）の水温、DOの鉛直分布観測結果を用いて、深層部のDO回復状況を捉えるとともに、同期間における沿岸水域の水温や気温、風等関連諸量の動向を整理した。その結果を**図 1.1.2**～**1.1.7**に示した。

なお、滋賀県が観測している北湖N局（水深75mまで観測）のデータも収集したが、ほとんどの年で循環期が欠測となっており、結果として検討に用いることはできなかった。

以下、**図 1.1.2**～**1.1.7**の整理結果をもとに深層部のDO回復に関して得られた知見をとりまとめる。

- 1)まず、**図 1.1.3**に示した1995年12月における深層部DO濃度（水深60m）の回復状況を見ると、12月22日から23日にかけて一時的にDO濃度が回復し、この時同水深の水温も一時的に上層部と同程度に上昇している。
- 2)この時の気温の状態を見ると、一時的かつ急激に気温が低下している。なお、この時、風については強風の状態ではなかった。
- 3)また、東岸の沿岸域の水温は、西岸に比べ低く、かつ気温の変動の影響を西岸よりもより受けやすくなっている。
- 4)以上のことから、この一時的な深層部のDO回復は、気温の低下に伴う湖面冷却が一時的に強くなり、冷却された湖岸の湖水により混合が起こり深層部にDOが供給されたものと推察される。
- 5)なお、この時、何故、水温が上昇するかについては、冷却された東岸側の湖水が湖の中央に向かって移動する際に周辺の比較的暖かい湖水を連行・混合するためと推察される。
- 6)深層部のDO濃度が一時的に回復し、その後再び低下する現象は、他の年にも見られるが、これは、湖面冷却による循環が一時的なものであり深層部全体には及んでおらず、一時的な湖面冷却が終われば、再び周辺から低DO濃度の湖水の影響を受けるためと推察される。

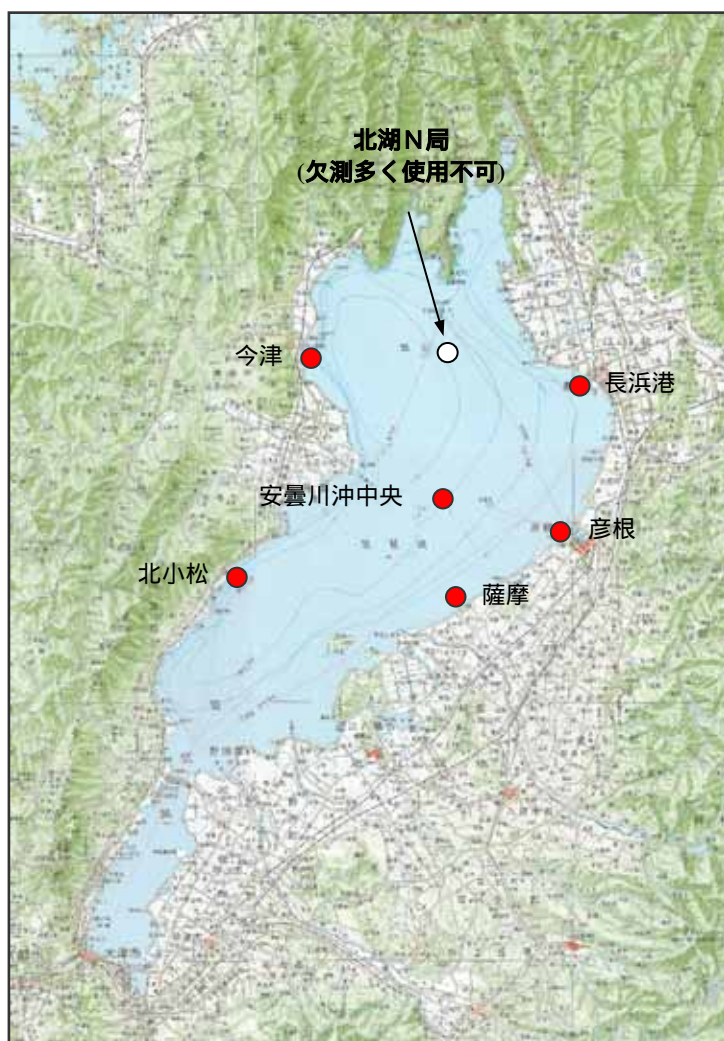


図 1.1.1 水質モニター等地点位置図
注) 図 2.1.2～2.1.7 に用いている地点のみを記載

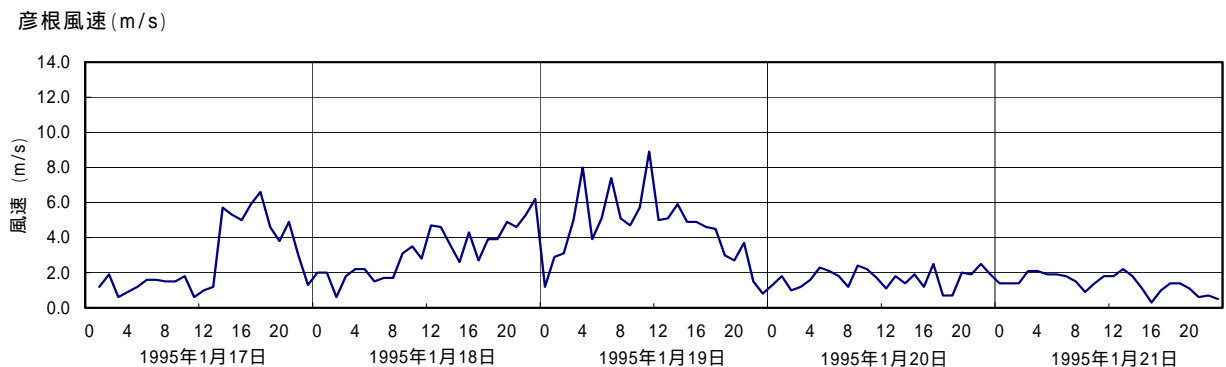
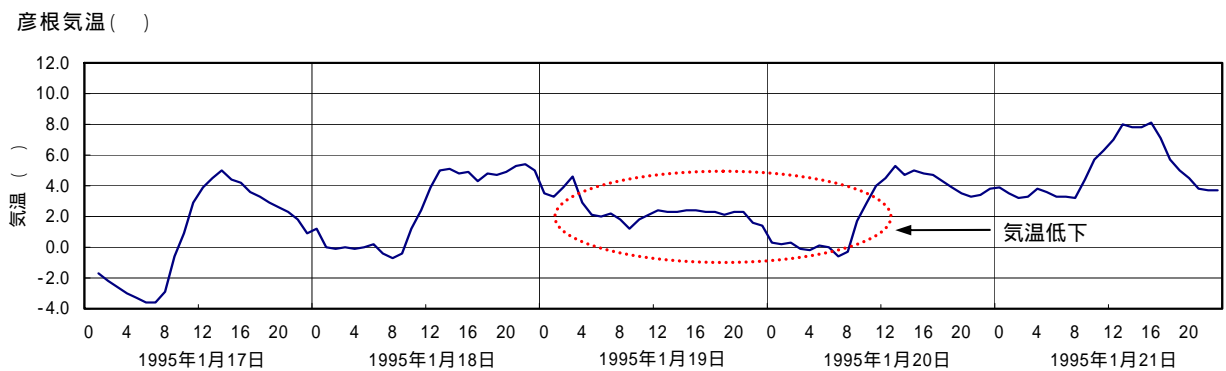
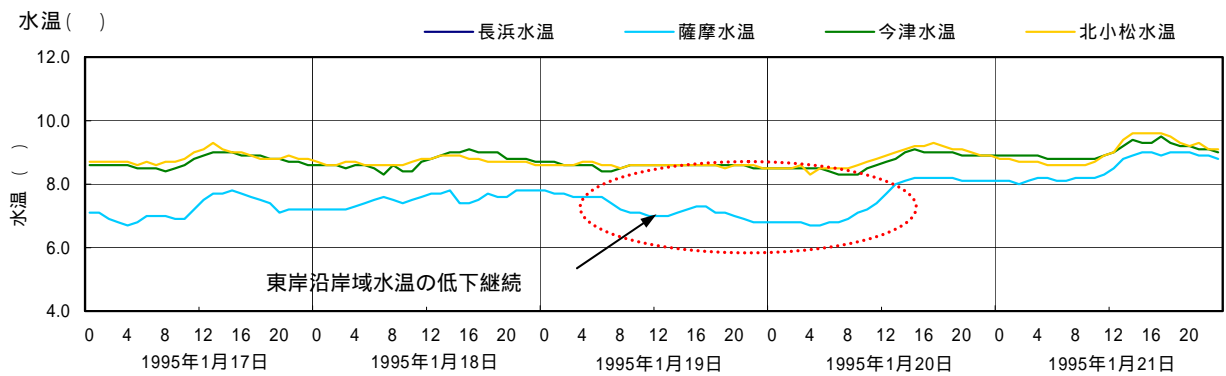
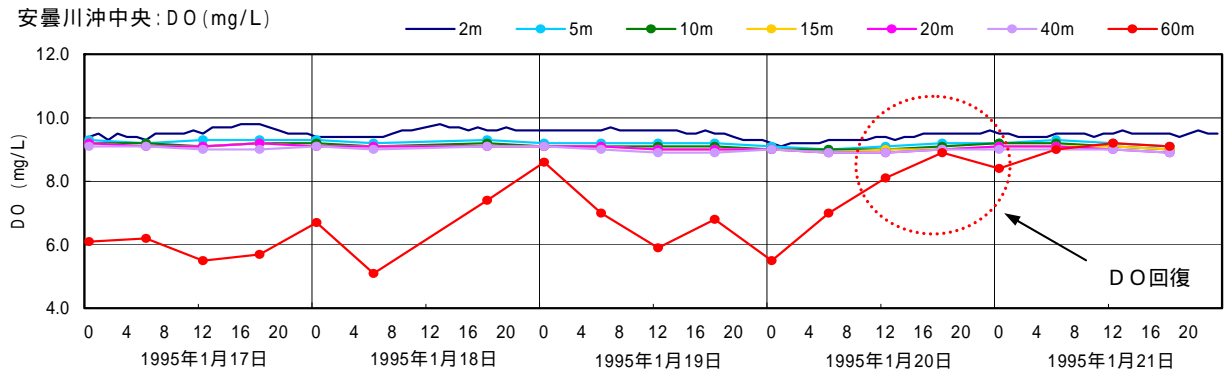
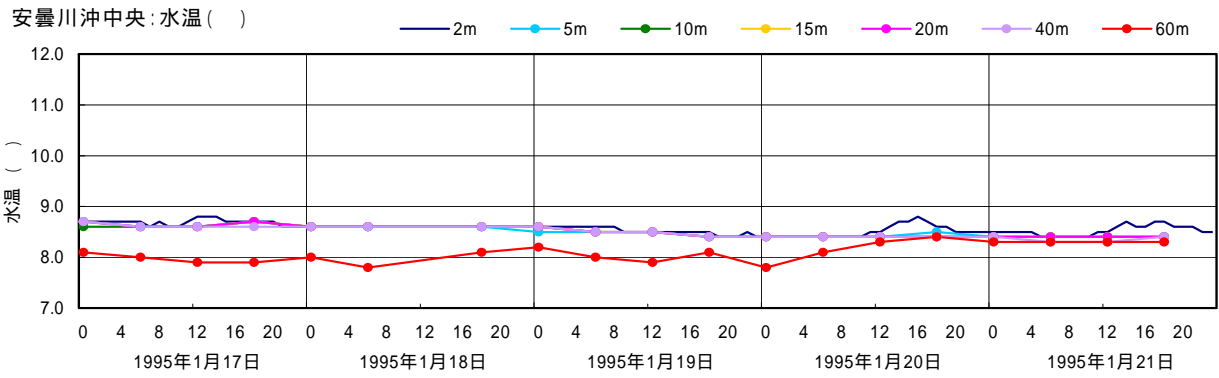


図 1.1.2 琵琶湖冷却期における DO 回復時の各諸量の動向 (その 1 : 1995 年 1/17 ~ 1/21)

- 7)一方、12月24日以降に生じている気温の急激な低下とその状態の継続により、湖面冷却による循環が促進され12月26日には深層部のDO濃度は上層と同程度となっている。
- 8)また、強風の発生と深層部DO濃度回復にも関連が認められる。これについては、風速とあわせて風向が重要である。琵琶湖においては、冬期に北西、北北西の季節風が卓越することが知られているが、この風により東岸に向かう吹送流が発達し、これが岸付近で反転して湖中央に向かう流れとなり、循環に影響を及ぼしている可能性がある。(これら循環のメカニズムについては後で詳述する)
- 9)東岸側の沿岸域については西岸側よりも水温が低く、かつ気温の変動を受けやすくなっている。これは、東岸側は水深が浅いために、沿岸の湖水が冷却されやすいことを示しており、気温低下に伴う循環発生時には湖岸からの冷たい湖水による流動の影響も考えられる。この点については1.6節に示したように、現在、現地調査を実施しており、その結果を踏まえ、琵琶湖における循環のメカニズムの把握に反映させる予定である。
- 10)その他の年においても、1995年12月の状況で説明したような現象が生起し、深層部のDO濃度が回復している。今後さらに詳細な検討が必要であるが、今回の検討によると湖面の冷却条件が継続することにより循環が進行し深層部のDOが回復することが基本的なメカニズムとなっているものと推察される。
- 11)くわえて、2000年1月の例にもあるように、強風の継続に伴う湖内流動によると思われる深層部のDO濃度の回復が卓越する場合があるとともに、気温低下と強風の両方が作用している場合も認められる。(95年、98年)

これらの知見を踏まえ、2000年1月および2002年12月のDO回復時を対象とし、琵琶湖における循環のメカニズム解明すべくさらに検討を進める。

- 1.1.2～1.1.7のデータ出典はつぎのとおり。
- ・安曇川沖中央水温・DOモニター結果(水資源機構)
 - ・湖岸水温モニター(滋賀県)
 - ・彦根気温・風速(彦根気象台)

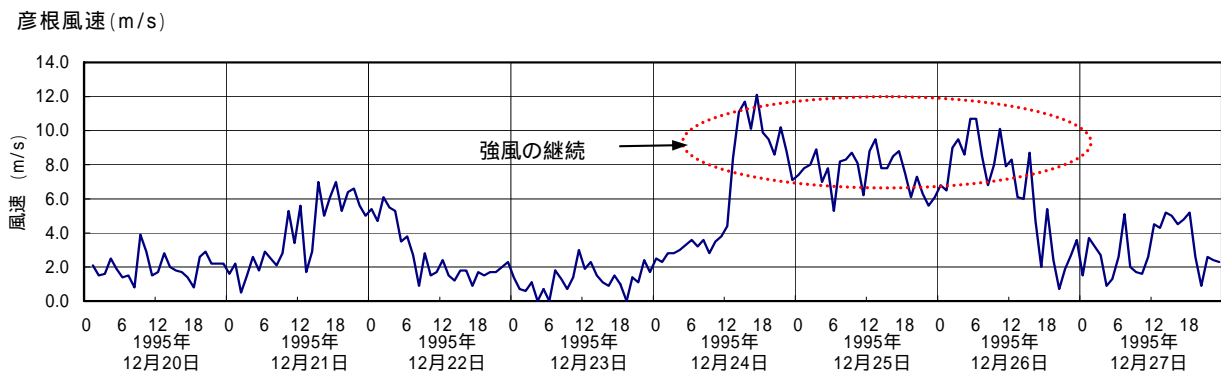
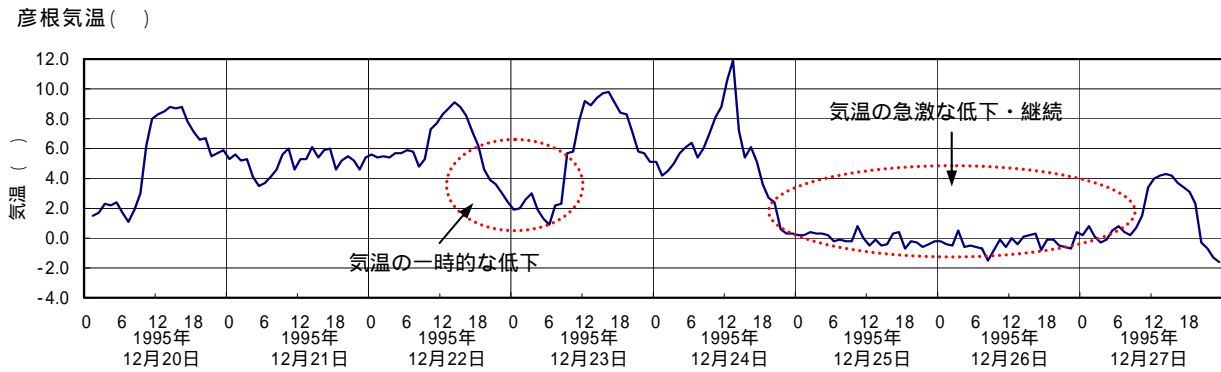
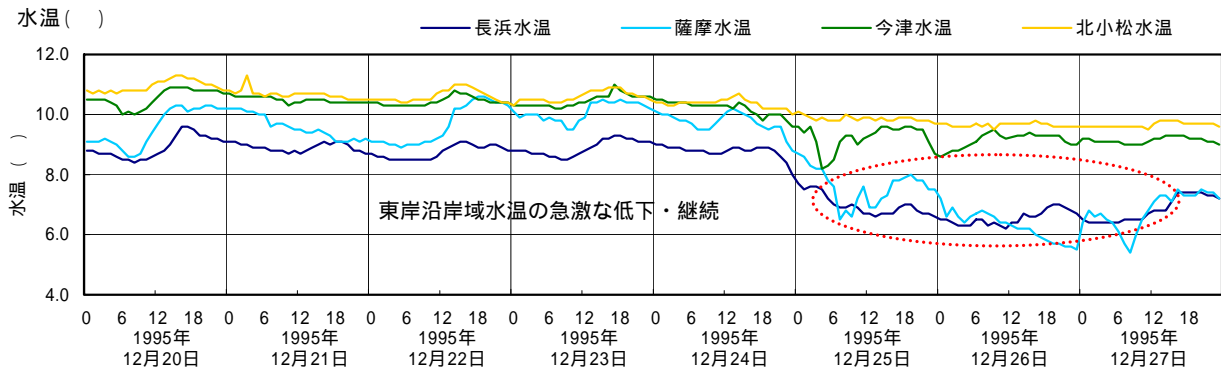
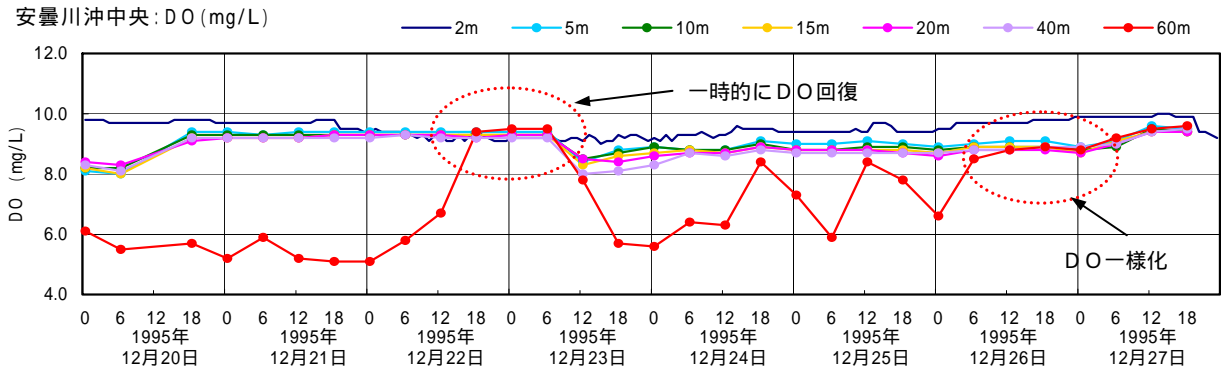
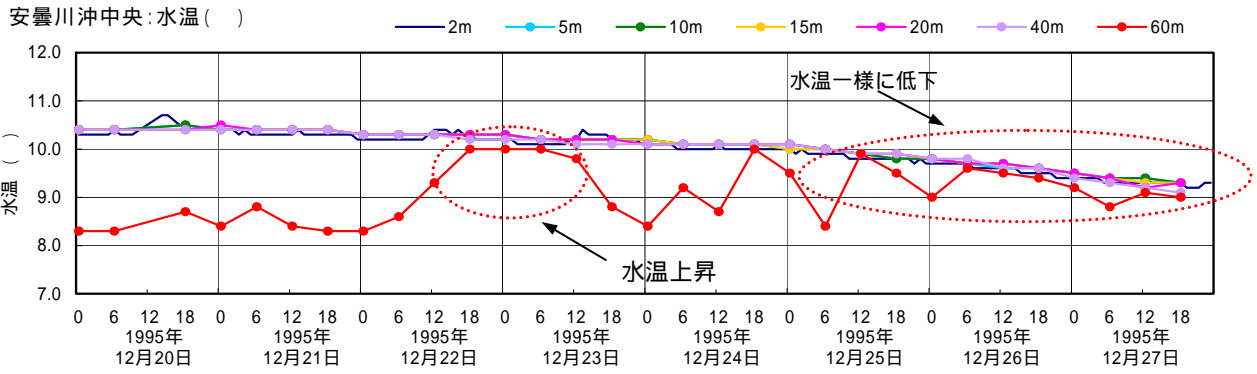


図 1.1.3 琵琶湖冷却期における DO 回復時の各諸量の動向 (その 2 : 1995 年 12/20 ~ 12/27)

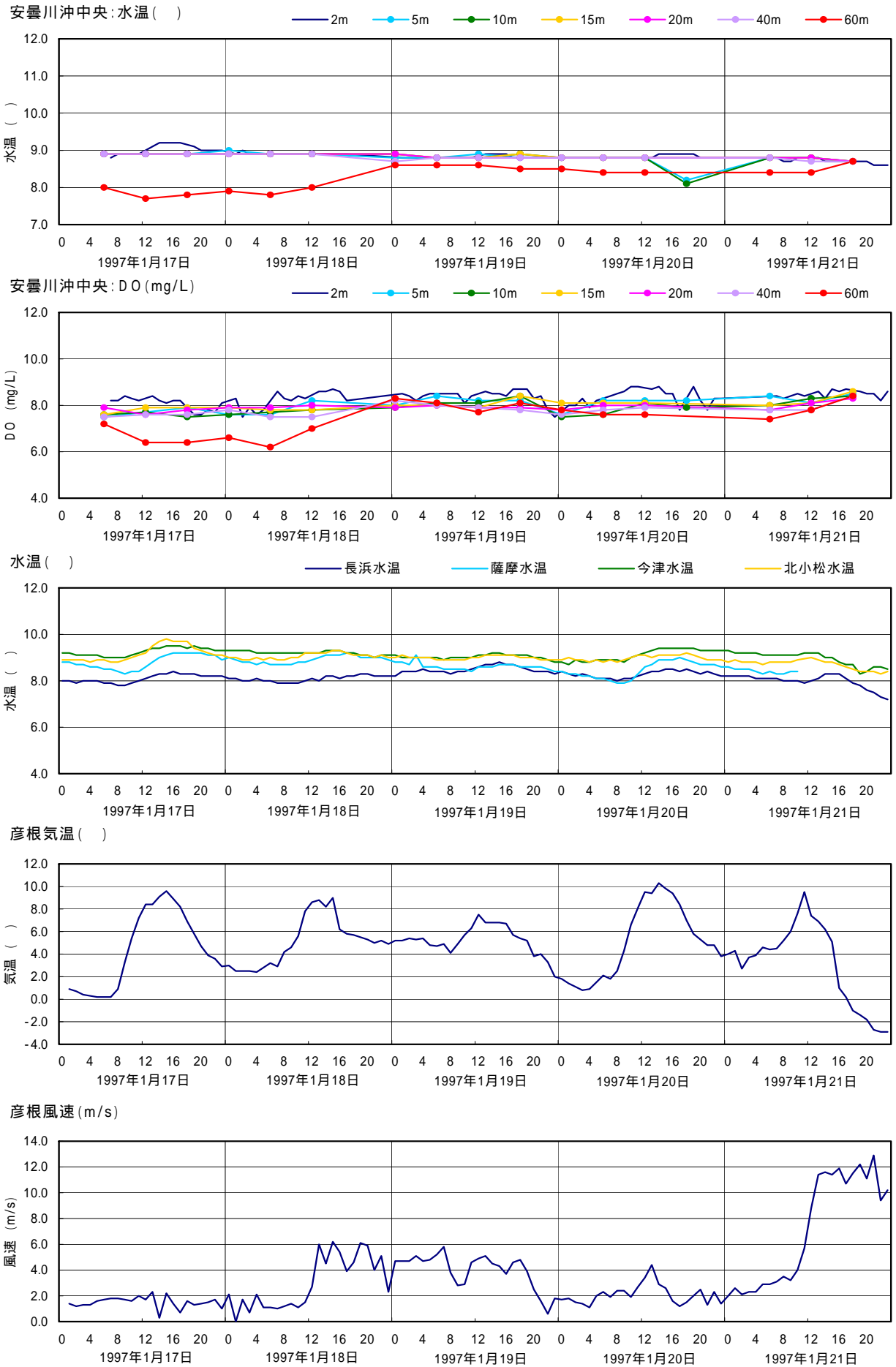


図 1.1.4 琵琶湖冷却期における DO 回復時の各諸量の動向 (その 3 : 1997 年 1/17 ~ 1/21)

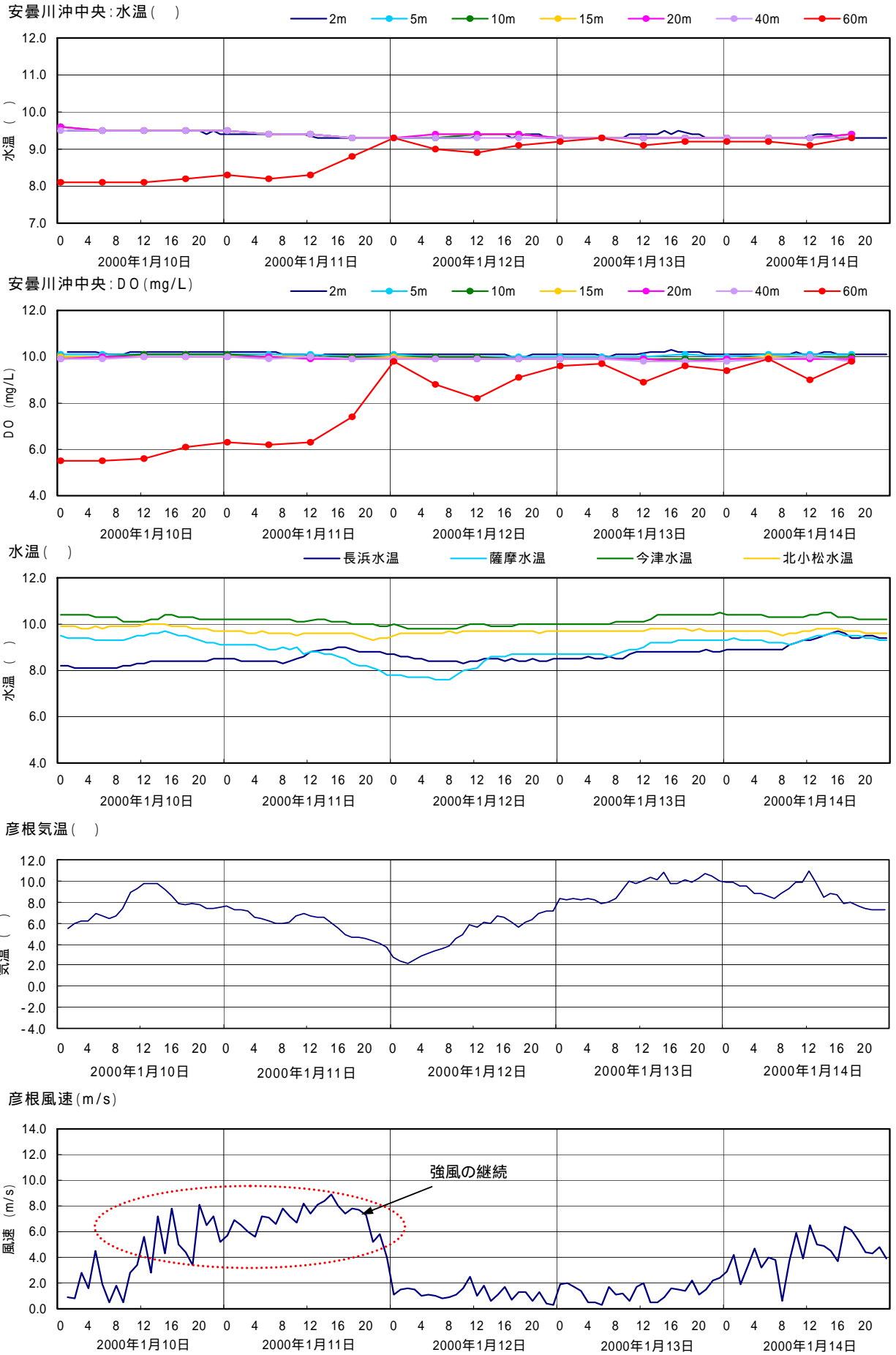


図 1.1.6 琵琶湖冷却期における DO 回復時の各諸量の動向 (その 5 : 2000 年 1/10 ~ 1/14)

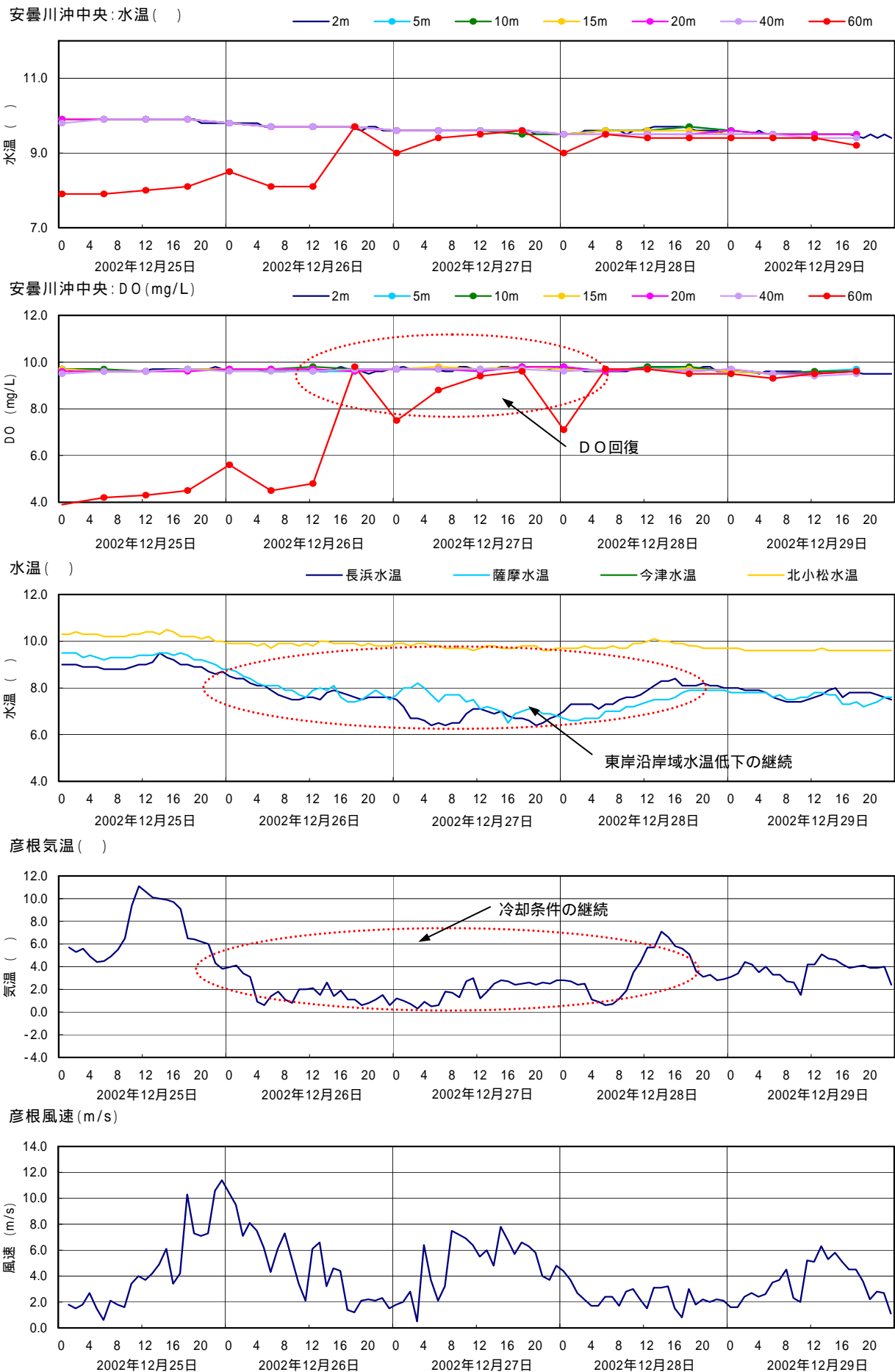


図 1.1.7 琵琶湖冷却期における DO 回復時の各諸量の動向 (その 6 : 2002 年 12/25 ~ 12/29)

(2) 琵琶湖の循環機構とDO回復の関連検討

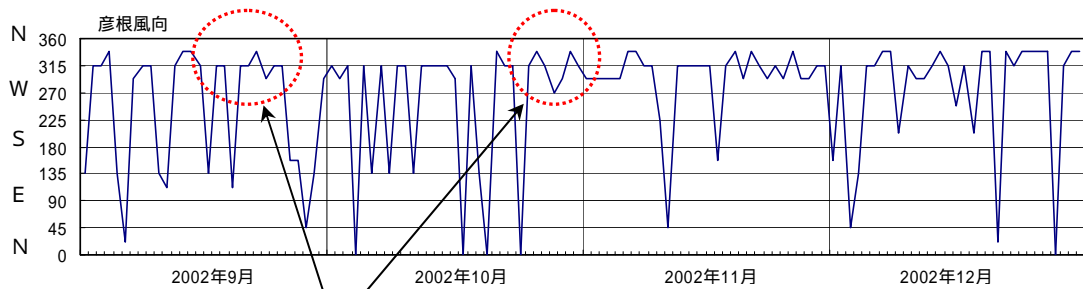
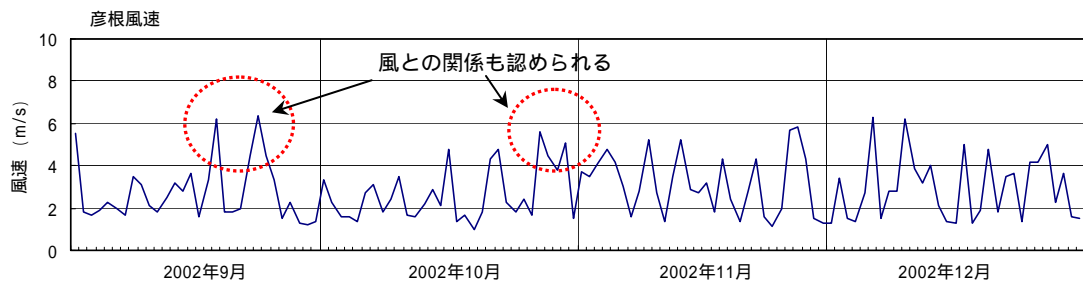
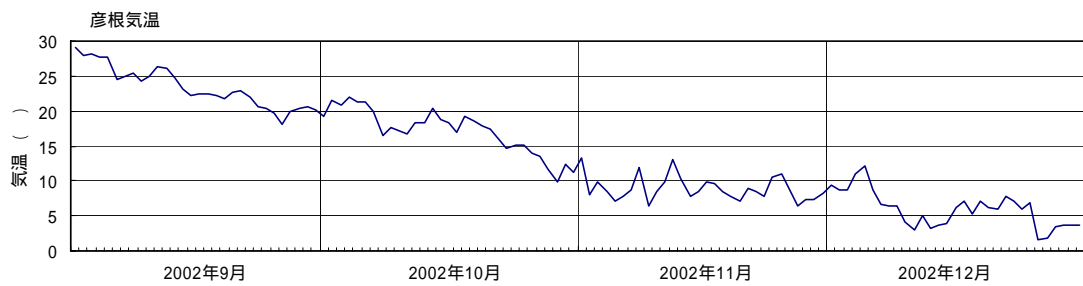
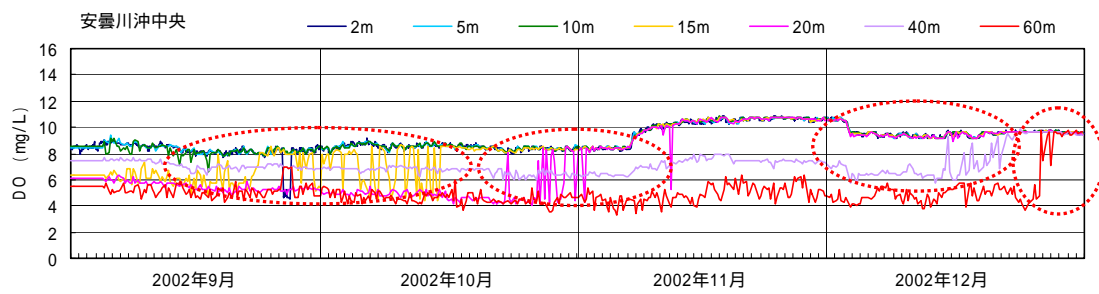
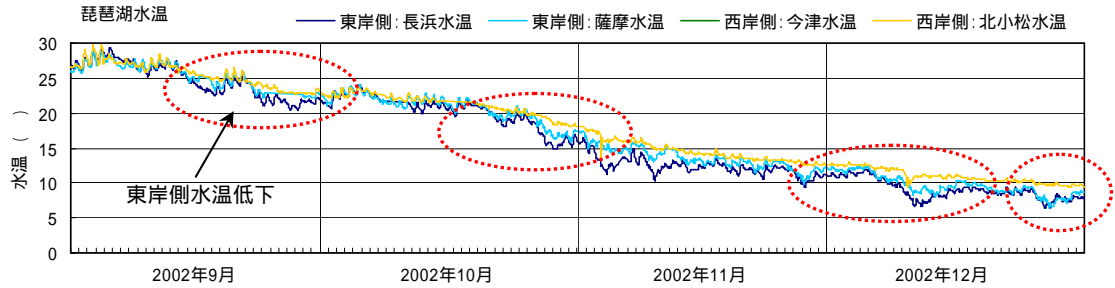
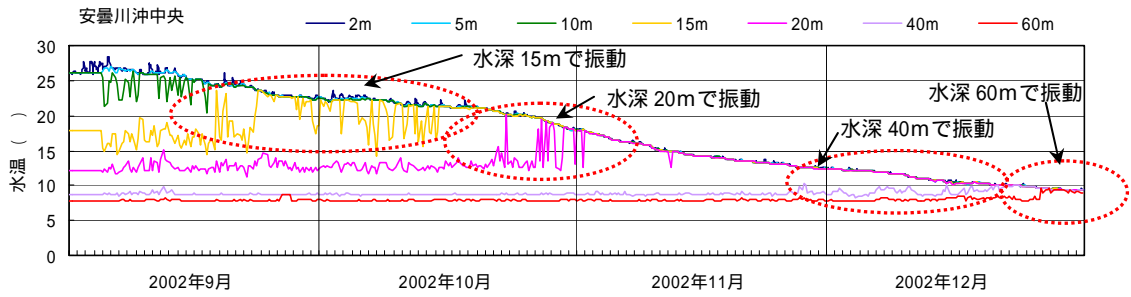
ここでは、前述のように安曇川沖中央地点で見た2000年1月および2002年12月のDO回復を具体例として、琵琶湖における循環期の湖水循環メカニズム、ならびにそれに伴うDO回復について詳細検討を行う。図1.1.8には、2002年9月～12月における安曇川沖中央地点の水深別水温、DO濃度の経時変化、北湖東岸、西岸に設置されている水温モニター結果と彦根地点における気温、風向・風速の推移を示した。同様に1999年10月～2000年1月の状況を図1.1.10示した。

これらの結果をもとに、琵琶湖の冷却期における水深別の水温、DO挙動について整理すると次のとおりである。

1) 琵琶湖冷却期における水温、DOの挙動

- ・水深15mは水温躍層位置に相当するが、同水深の湖水は同年10月の中旬に上層の水温と均一化、すなわち循環層に取り込まれているが、その前に、図1.1.8に示すように9月半ば過ぎより大きく振動し、その後上層の水温と同じレベルとなり安定するといった推移を示している。
- ・なお、大きく水温が振動する前にも15m水深の水温は振動しているが、これは内部波によるものと考えられる。(内部波と上記の循環が始る水温変化とは明らかに変動の大きさが異なっている。)
- ・水深15m水温の特徴は、すべての水深の水温に現れており、各水深の湖水が上層の循環層に取り込まれる前には、15m水深の水温で見られたように水温が振動する現象が認められる。
- ・各水深の水温が振動する場合の特徴としては、水温が上昇する場合は上層部の水温と同じ程度に高くなり、低くなる場合は振動が生起する前と概ね同様のレベルに戻る動きとなる。
- ・この時のDOの挙動をみると、各水深ともに水温と同様に濃度が上下する動きを示しており、水温が高くなるとDO濃度も高くなり、上層の混合層と同程度の濃度まで上昇している。
- ・この水温、DOの特徴については、2002年の9～12月における特別なものではなく図1.1.10に示した1999年～2000年にかけての冷却期でも同様の特徴が明瞭に現れている。(その他の年についても同様の特徴が認められる。)
- ・また、2002年を例として各水深の水温、DO濃度が振動する様子を鉛直分布で示した結果を図1.1.14～1.1.19に整理した。これによると、15mおよび20m水深では、水温の上昇に伴ってDO濃度も上昇し、またもとに戻る様子が比較的明瞭に示されている。
- ・水深が深くなる40mおよび60m地点でも水温とDOの上昇関係は認められるが、DO濃度の上昇にくらべて水温の上昇はさほど大きなものになっていない。
- ・この水温とDO濃度の関係を相関図で示すと、2002年の場合は図1.1.9に示すとおりであり、1999年から2000年の冷却期の場合は、図1.1.11に示すとおりである。
- ・これらの図に示すように、循環層に取り込まれるまで生起する水温、DOは、上述のように水温が高くなると、DO濃度も高くなる関係となっており、これらの関係は、いずれの水深、また冷却期間が異なっても同様の関係となっている。
- ・一般に、DOの飽和濃度は、水温が高くなると低くなるが、ここでは各水深で生起する振動期間では両者に正の相関関係が認められる。

では、何故、各水深が上部の循環層に取り込まれる前に、水温、DO濃度が振動するのか、またこの振動期間においては、水温とDO濃度の正の相関関係が存在するのかの検討も含め、琵琶湖の冷却期における循環を生じさせる要因等との関係をつぎに検討する。



データ出典：安曇川沖中央モニター（水資源機構）
 湖岸水温モニター（滋賀県）
 彦根気象諸量（彦根気象台）

図 1.1.8 琵琶湖冷却期における各諸量の動向（2002年9月～12月の例）

2) 琵琶湖における循環機構とDO回復の関連検討

本節の冒頭にて検討した各年におけるDO回復時に関する知見や図1.1.8および1.1.10に示した琵琶湖冷却期における水深別の水温、DO濃度と関連諸量の推移から、琵琶湖における循環機構が概ね把握可能であり、前述の水温、DOの振動や、両者の関係についてもつぎのような現象が生起しているものと推察される。

- ・2002年の水深15mの水温、DOを例にとると、振動が開始する直前の状態をみると、東岸側の長浜水温が低くなっていることが特徴の一つとしてまずあげられる。また、同時期北北西の風が強まっている。
- ・琵琶湖、特に北湖においては冷却期にあたる秋期～冬期には北西、北北西の季節風が卓越し、これによって湖面上にも吹送流が発達し、東岸に向かう流れが生じる。なお、風による吹送流の発生は、よく知られた一般的な知見である。

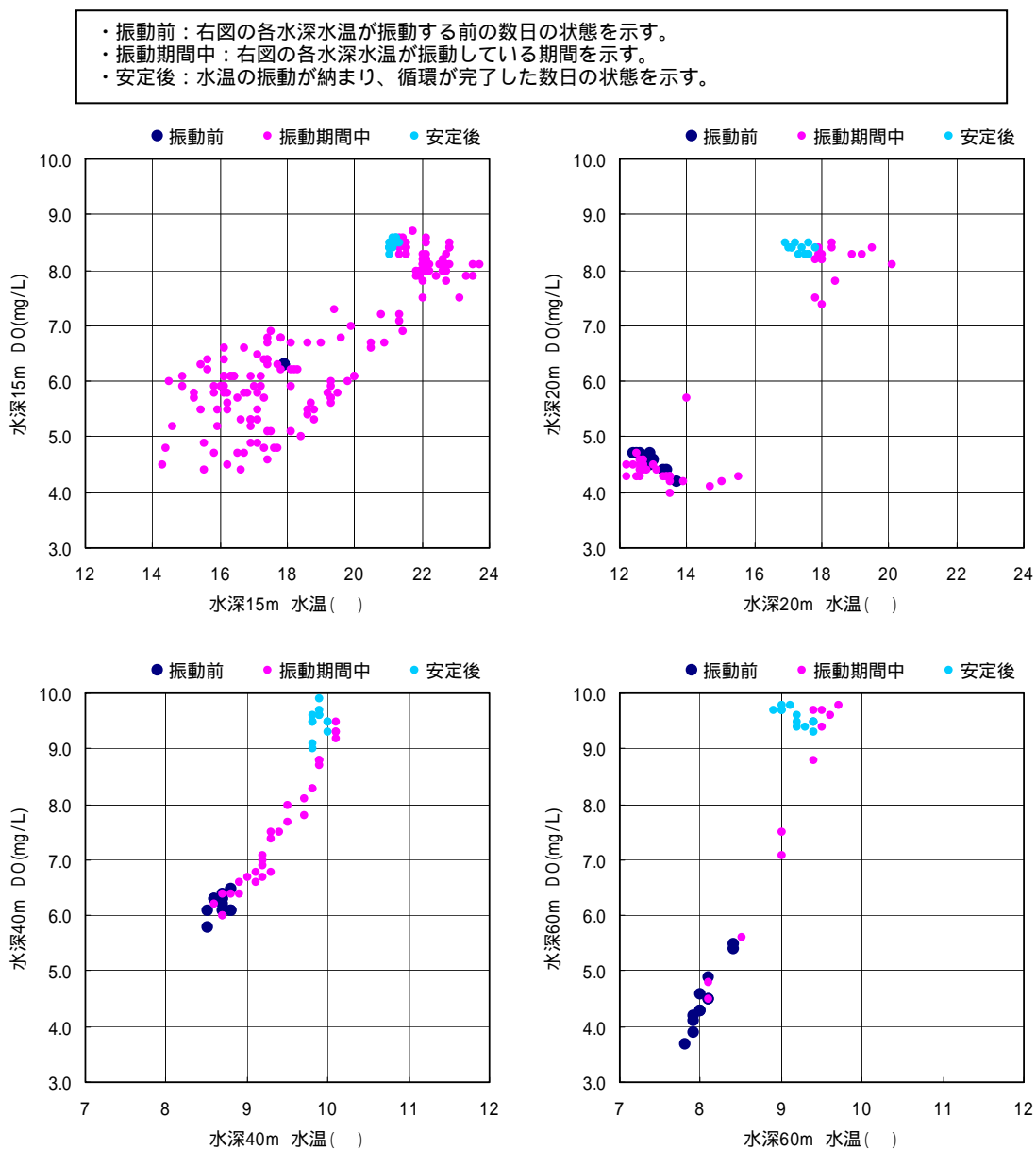
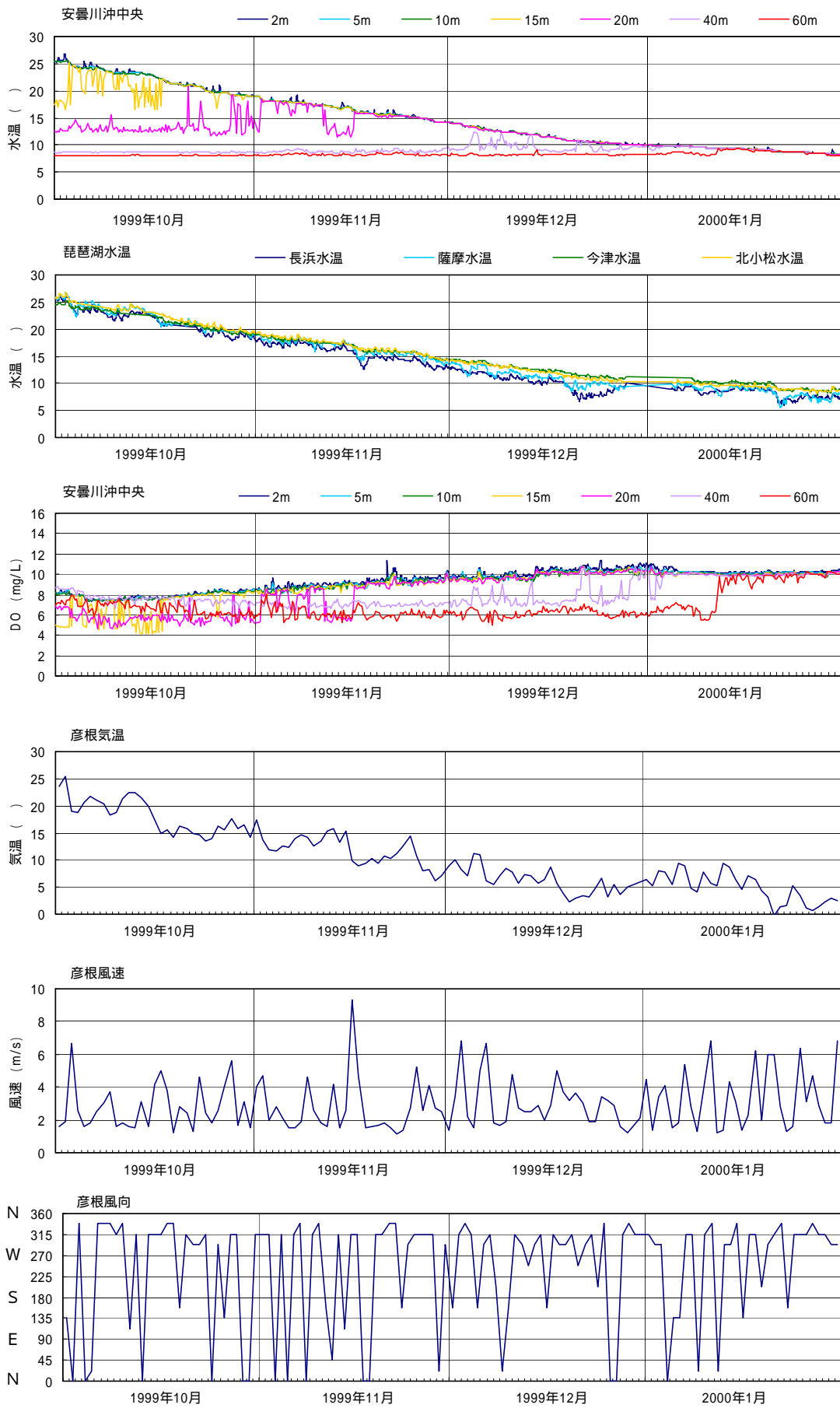


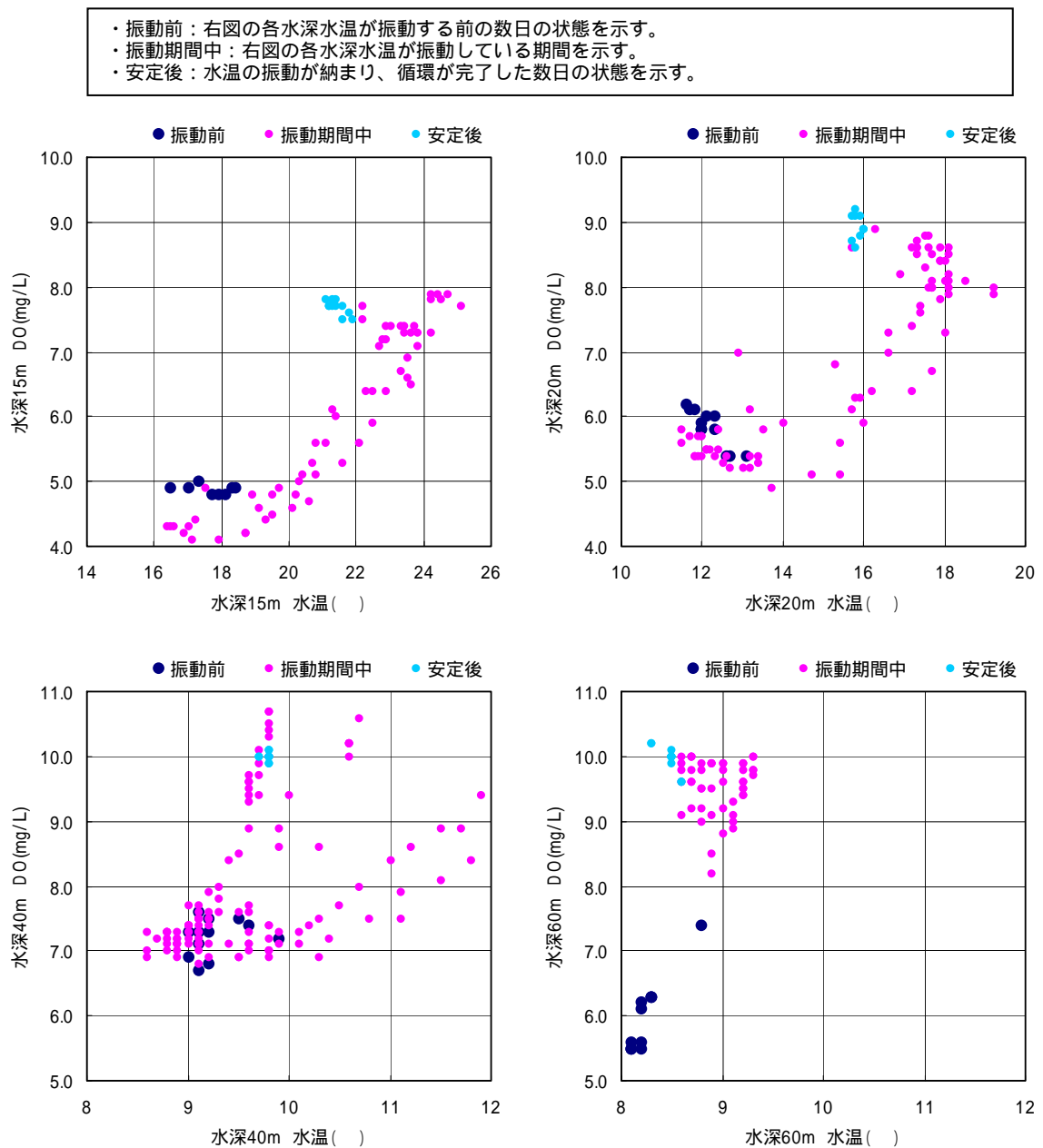
図1.1.9 各水深の循環過程における水温とDOの関係（安曇川沖中央：2002年）



〔データ出典：安曇川沖中央モニター（水資源機構）
湖岸水温モニター（滋賀県）
彦根気象諸量（彦根気象台）〕

図 1.1.10 琵琶湖冷却期における各諸量の動向（1999年10月～2000年1月の例）

- ・北西、北北西の風は図 1.1.12 に示すように東岸の浅水域帯に直行するような方向となり、これらの風によって発達した吹送流は東岸で反転し、気温の低下によって冷却され重くなった東岸域の湖水を一気に湖央に押しやる力となる。
- ・この冷却された湖岸水は、循環が進んではいるが下層に比べて比較的暖かくかつ DO 濃度の豊富な周辺水と混合しながら安曇川沖中央に向かって進行する。
- ・この水が通過したときに、水深 15m の水温、DO 濃度も一時的に上昇し、通過してしまえばもとの状態となる。通過した湖水は補償流的に西岸側で表層へ向かう流れとなるものと推察される。
- ・これらの現象が繰り返されることにより、水深 15m までの循環が徐々に進行し、その過程として 15m 水深の水温、DO 濃度が一時的に振動するような挙動を見せるものと考えられる。



(データ出典：水資源機構)

図 1.1.11 各水深の循環過程における水温とDOの関係(安曇川沖中央：1999年9月～2000年1月)

- ・2002年の20m水深の循環過程も15mの場合とまったく同様であり、循環に伴う水温、DO濃度の振動が始まる直前では、気温低下とともに東岸の湖岸水の水温が低下し、北北西の風が強まっている。
- ・ただし風の条件については、同じ循環過程でも弱い場合があったり、強く作用する場合があります、その差は循環までに要する期間に差が出るものと推察される。
- ・これに関しては、気温の低下も同様であり、1999年の水深20mの水温の例にあるように、振動期間は長いですが、その間さほど顕著な東岸域の水温低下はない。
- ・なお、図1.1.10に示した2000年1月下旬での深層部まで循環が及んだ後の、完全循環期に相当する2月における安曇川中央における水温とDOの関係を図1.1.13示した。
- ・同図に示すように完全循環期においては、水温が低いほどDO濃度は高くなる関係となる。
- ・すなわち、気温が低く湖水温が低くなるほど、深層部まで循環がおよび深層部のDO濃度も高くなる。
- ・このように、琵琶湖における深層部のDO濃度が高いレベルに回復するためには、融雪水が多く流入するかによるのではなく、時期的にその前に当たる1~2月に如何に寒くなり、水温が低下するかにかかっている。

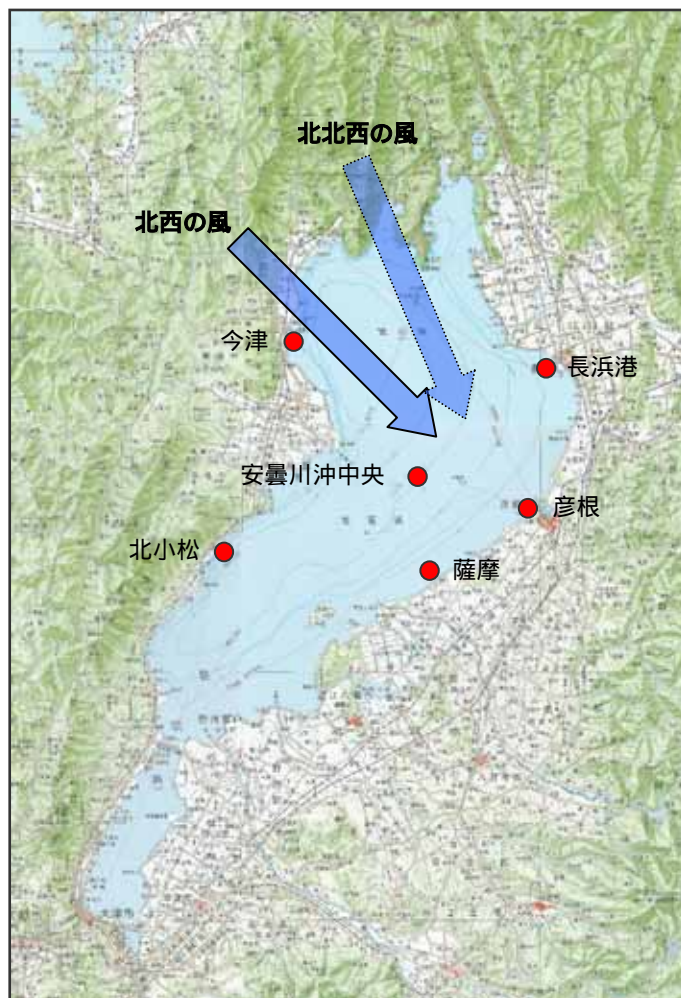
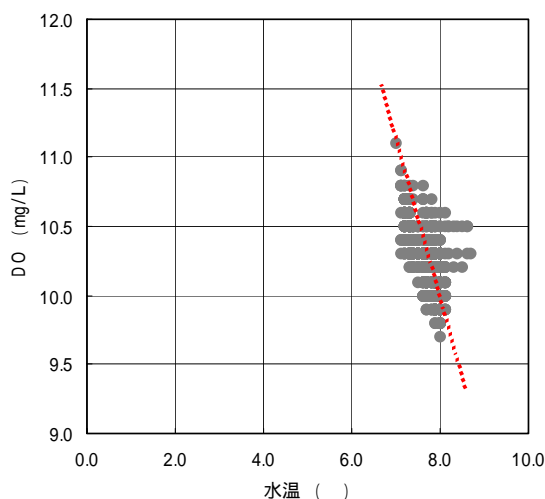


図 1.1.12 水質・気象モニター地点位置と季節風の関係



注) 全水深のデータをプロット

図 1.1.13 安曇川沖中央における完全循環期の水温とDO関係 (2000年2月)

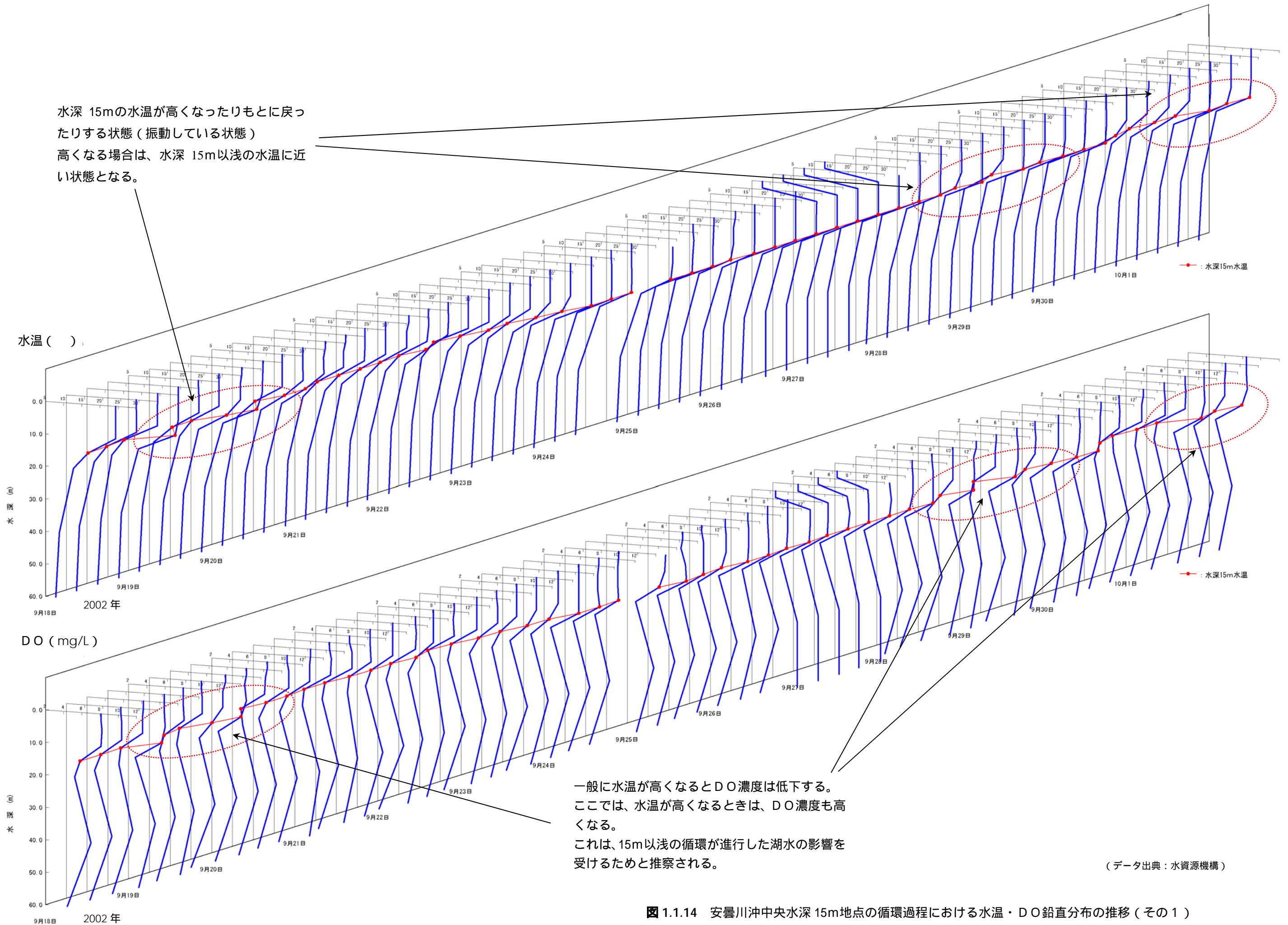
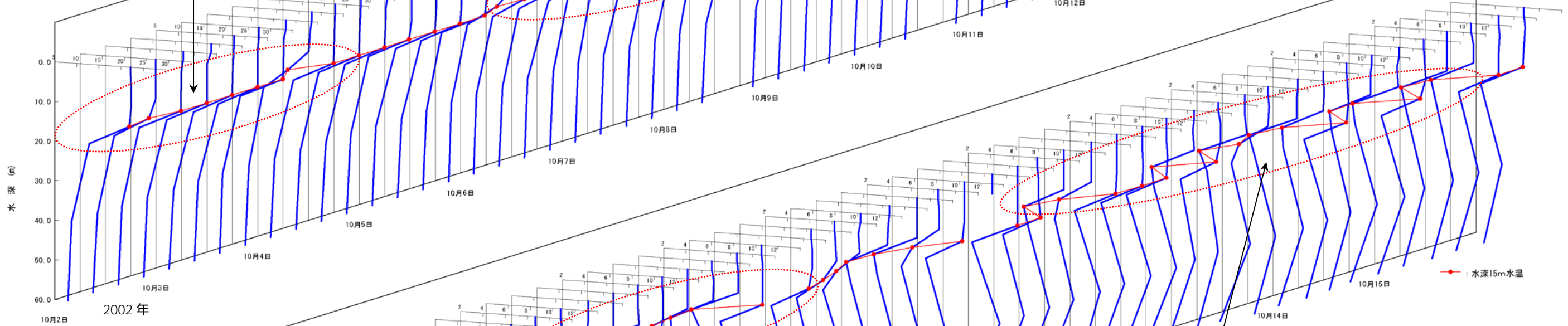


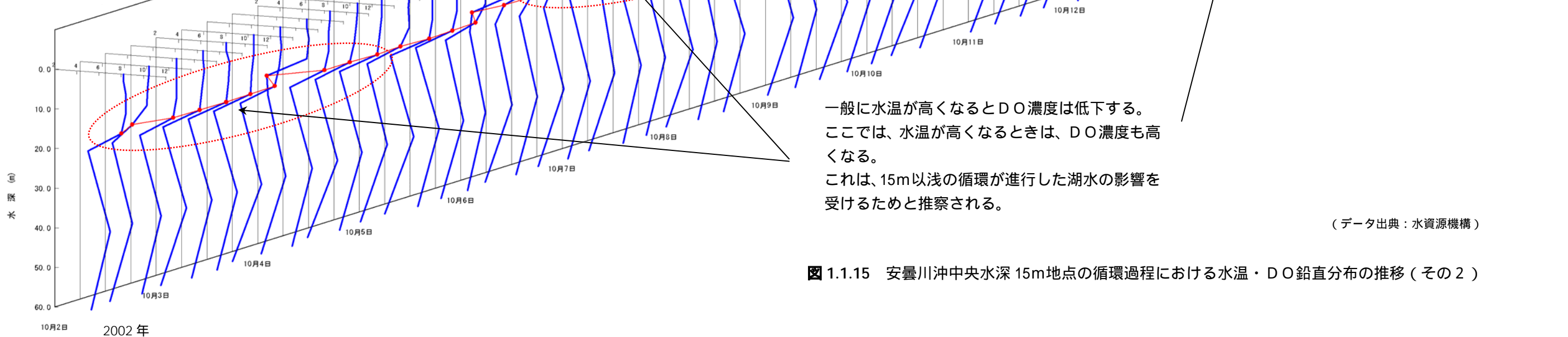
図 1.1.14 安曇川沖中央水深 15m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移（その1）

水深 15mの水温が高くなったりもとに戻ったりする状態（振動している状態）
 高くなる場合は、水深 15m以浅の水温に近い状態となる。

水温 ()



DO (mg/L)

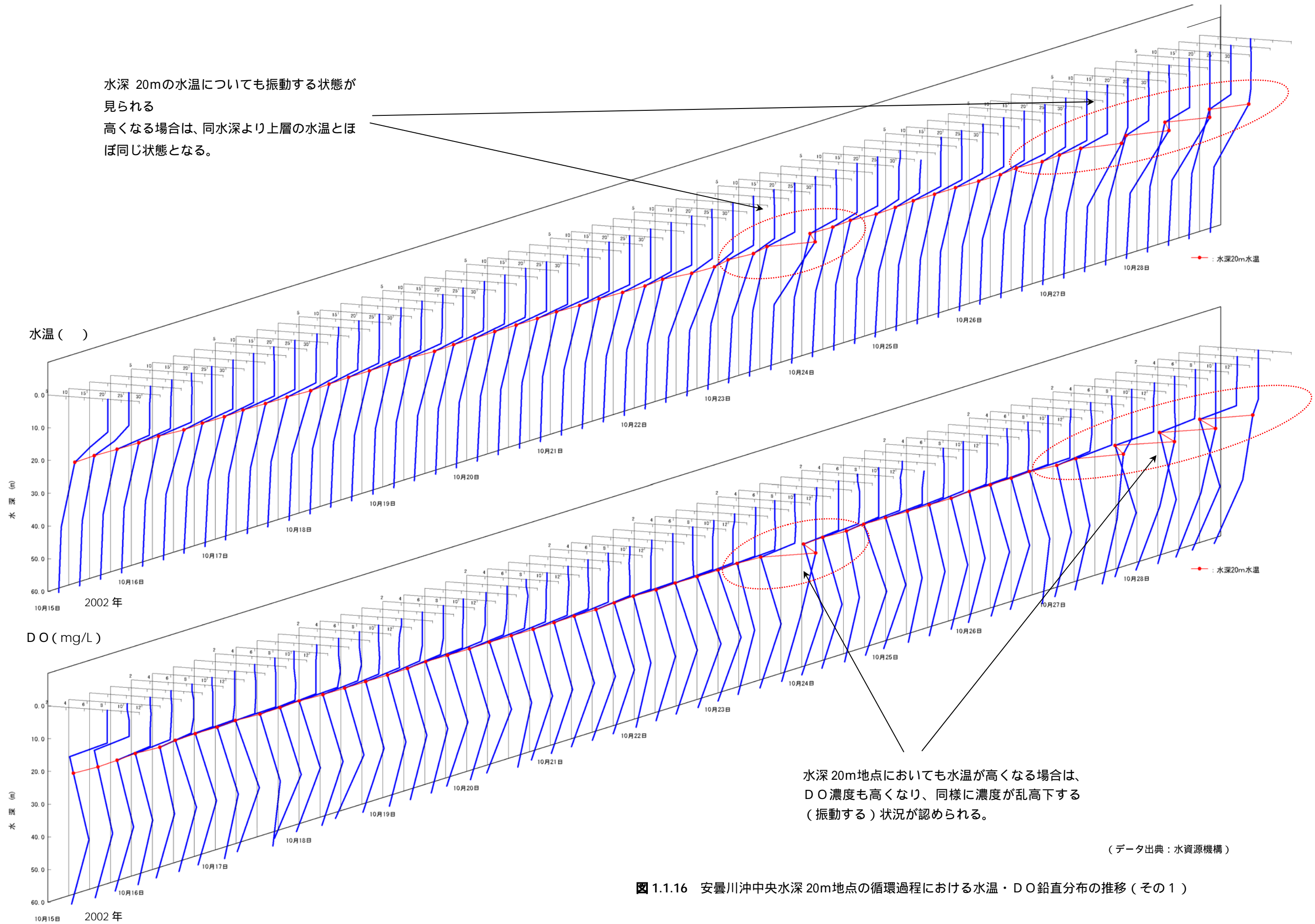


一般に水温が高くなるとDO濃度は低下する。
 ここでは、水温が高くなる時は、DO濃度も高くなる。
 これは、15m以浅の循環が進行した湖水の影響を受けるためと推察される。

(データ出典：水資源機構)

図 1.1.15 安曇川沖中央水深 15m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移 (その2)

水深 20mの水温についても振動する状態が見られる
 高くなる場合は、同水深より上層の水温とほぼ同じ状態となる。



水深 20m地点においても水温が高くなる場合は、
 DO濃度も高くなり、同様に濃度が乱高下する
 (振動する) 状況が認められる。

(データ出典: 水資源機構)

図 1.1.16 安曇川沖中央水深 20m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移 (その1)

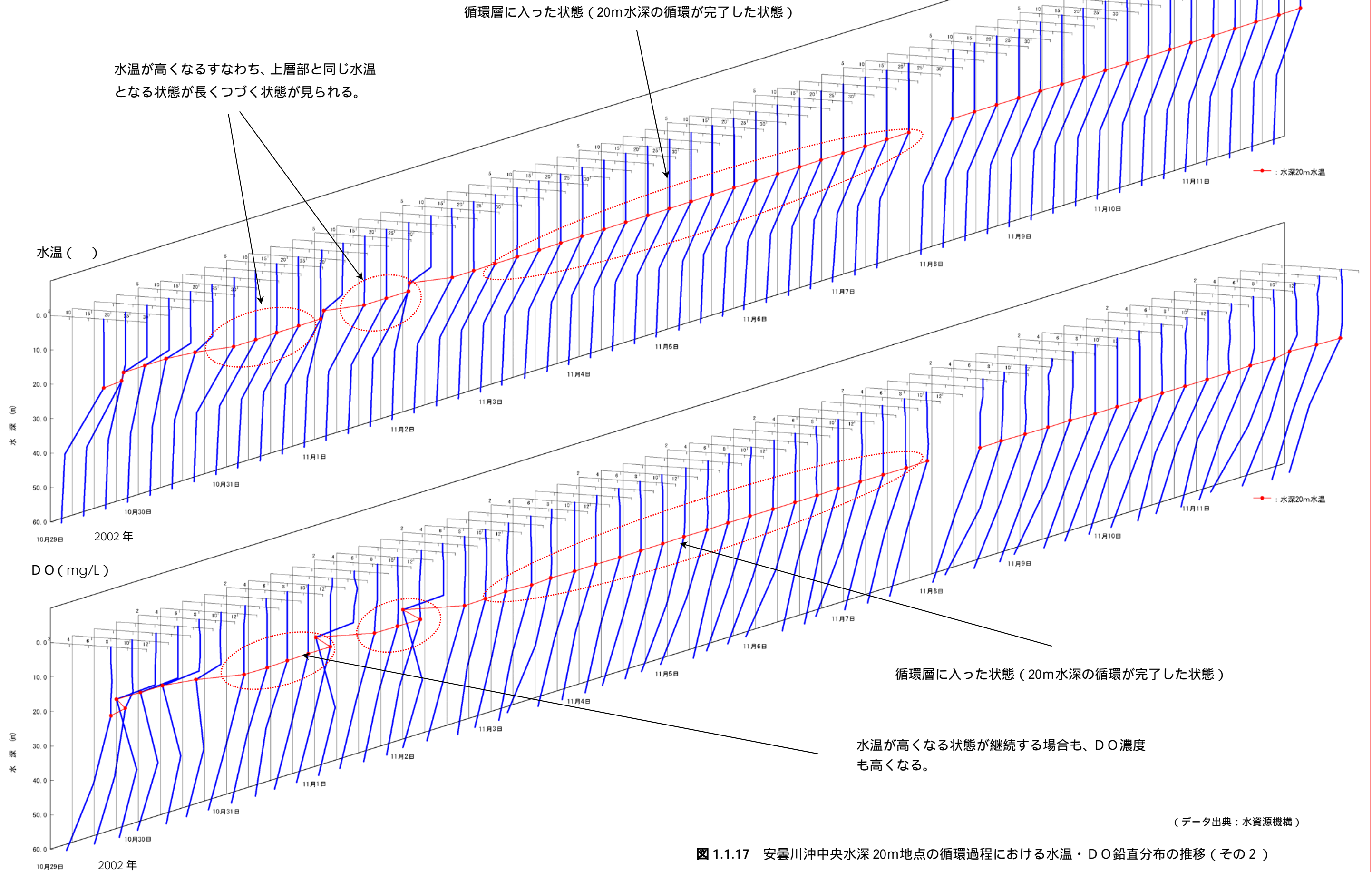


図 1.1.17 安曇川沖中央水深 20m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移 (その2)

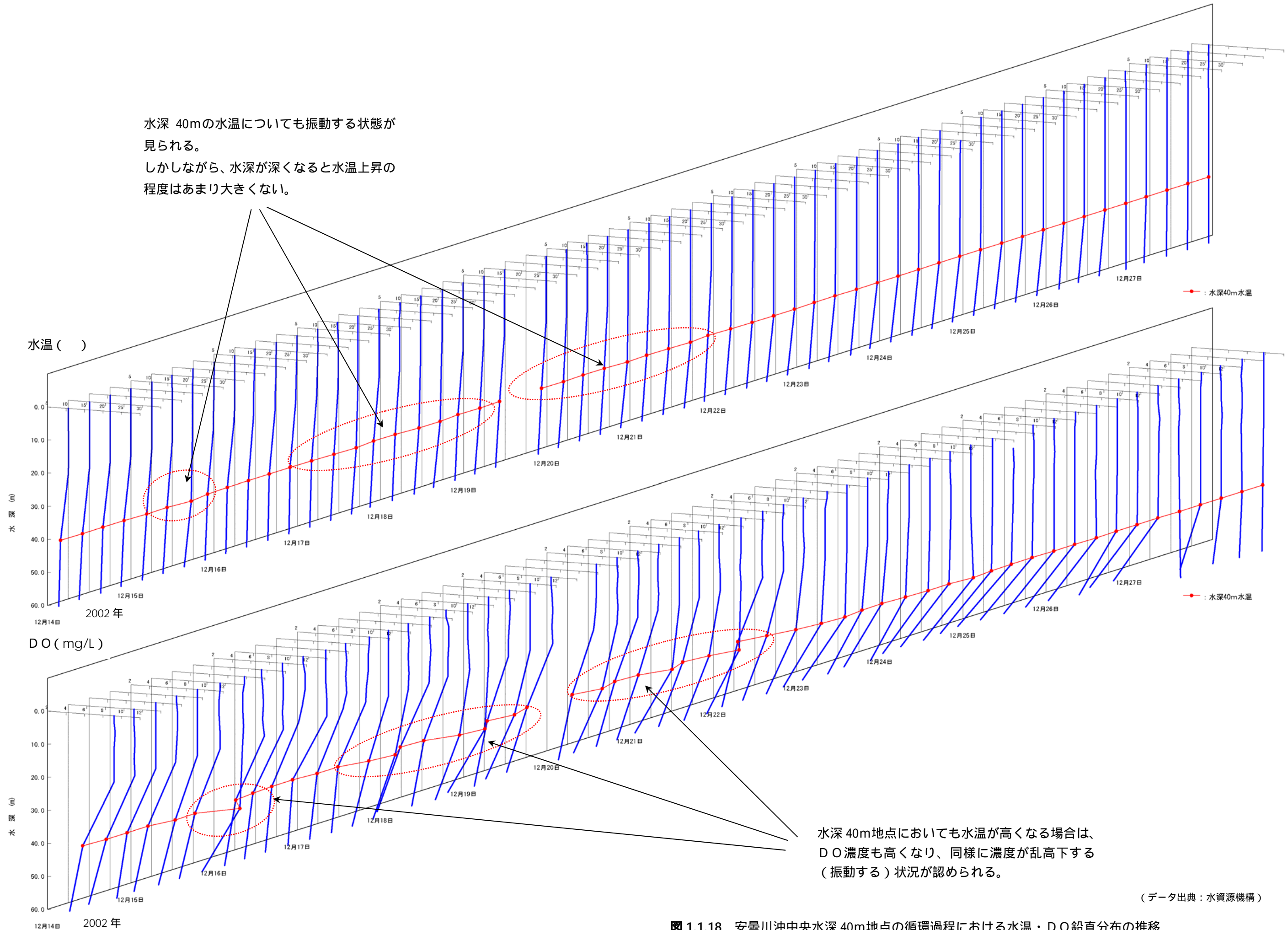
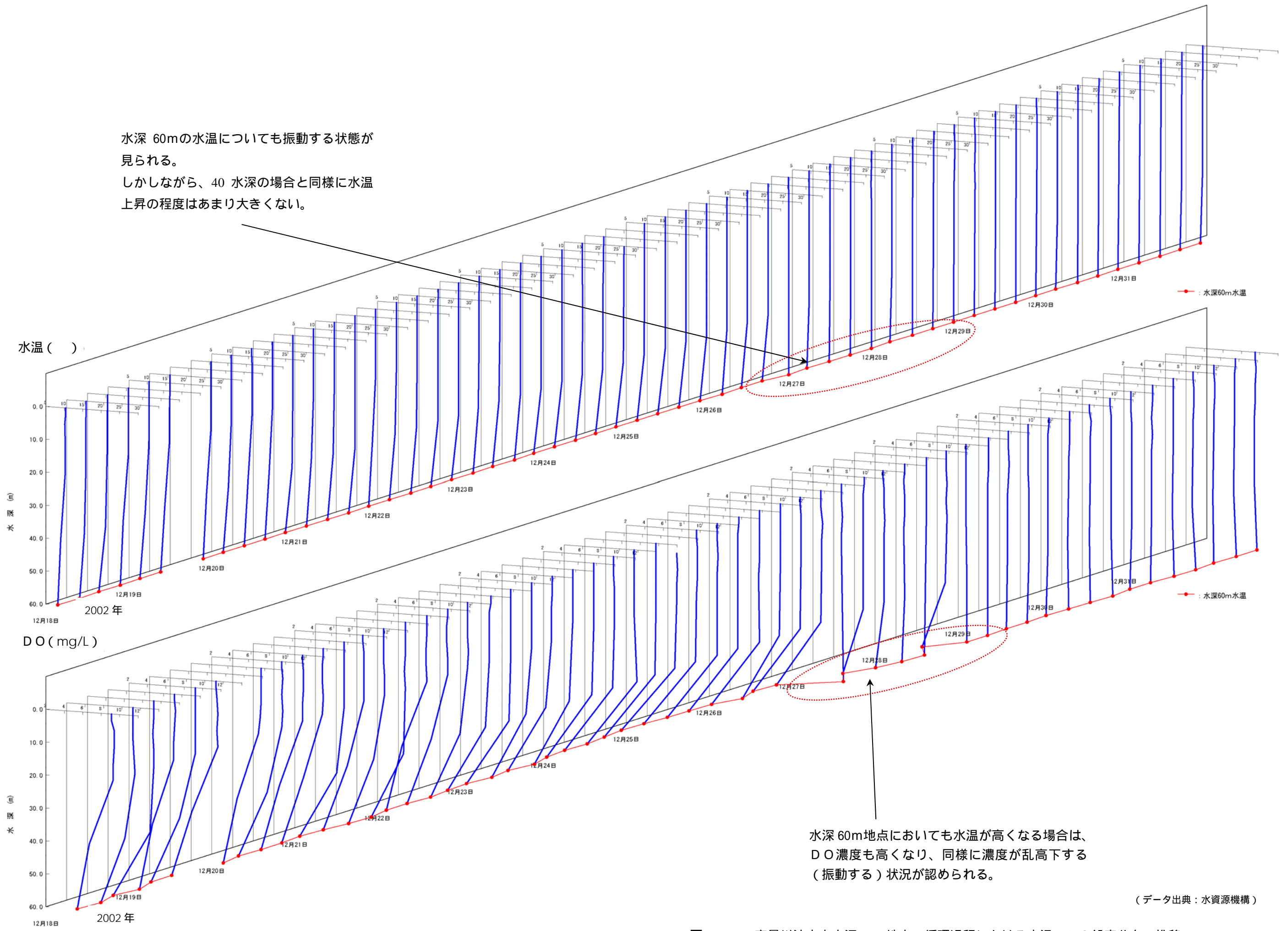


図 1.1.18 安曇川沖中央水深 40m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移



水深 60mの水温についても振動する状態が見られる。
 しかしながら、40 水深の場合と同様に水温上昇の程度はあまり大きくない。

水深 60m地点においても水温が高くなる場合は、DO濃度も高くなり、同様に濃度が乱高下する（振動する）状況が認められる。

（データ出典：水資源機構）

図 1.1.19 安曇川沖中央水深 60m地点の循環過程における水温・DO鉛直分布の推移

(3) 琵琶湖冷却期における循環機構とDO回復要因に関するまとめ

以上までの検討成果をもとに、琵琶湖の冷却期における循環機構を模式図の形でとりまとめると図1.1.20に示すとおりであり、そのプロセスを再度整理するとつぎのとおりである。

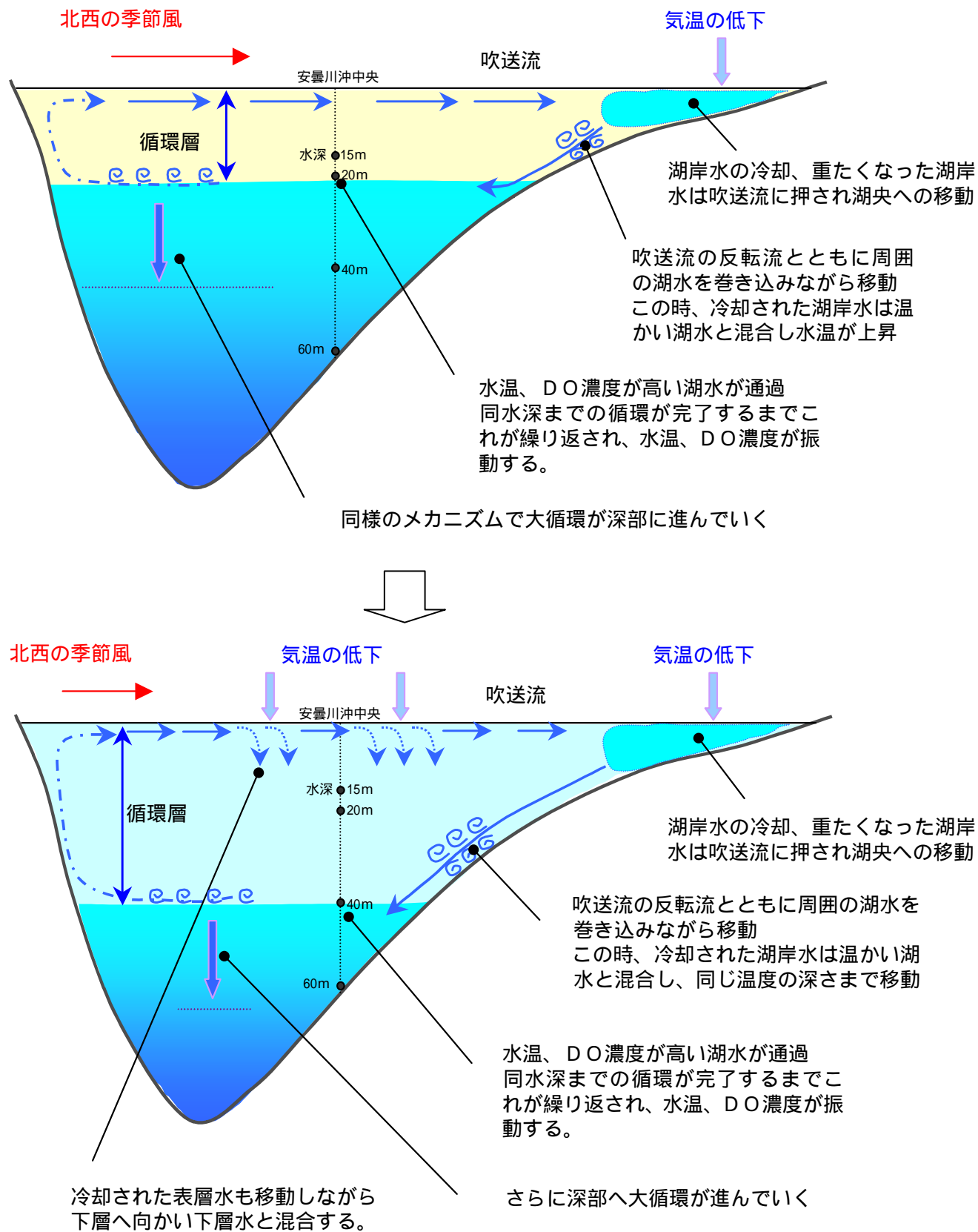


図 1.1.20 琵琶湖の冷却期における循環機構のまとめ (仮説)

琵琶湖の循環のメカニズム

【調査結果（1995～2002年の琵琶湖水質連続観測データによる）】

琵琶湖表層（水温躍層より上部の循環層）では、おおむね9月末頃より湖面の冷却が始まる。冷却が進むにつれ、表層部の水温が低下し躍層の位置が上下に振動しながら下方に移動（循環層が下方に拡大）する。躍層の直下の水が循環層に取り込まれる際、それまでおおむね一定であった水温・DOがともに一時的に増加方向に振動し、循環層の水温・DOに移行する。このようにして徐々に循環層の水温が低下、層厚が増大していく。

（なお、湖水の冷却は湖面全域でなされるが、経時的な水温低下は水深の浅い東岸域においてより顕著にみられる。また秋～冬季は北西～北北西の季節風が卓越する。）

【調査結果から推察されること】

全層循環に至る基本的メカニズムは、秋季より表層付近の循環が徐々に下方を侵食し循環層厚が増大していくものと考えられ、循環期のDO回復にはこのメカニズムが大きく寄与している。